

Электронные интерферометры в режиме квантового эффекта Холла

Э.В. Девятов,

Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка,



План лекции

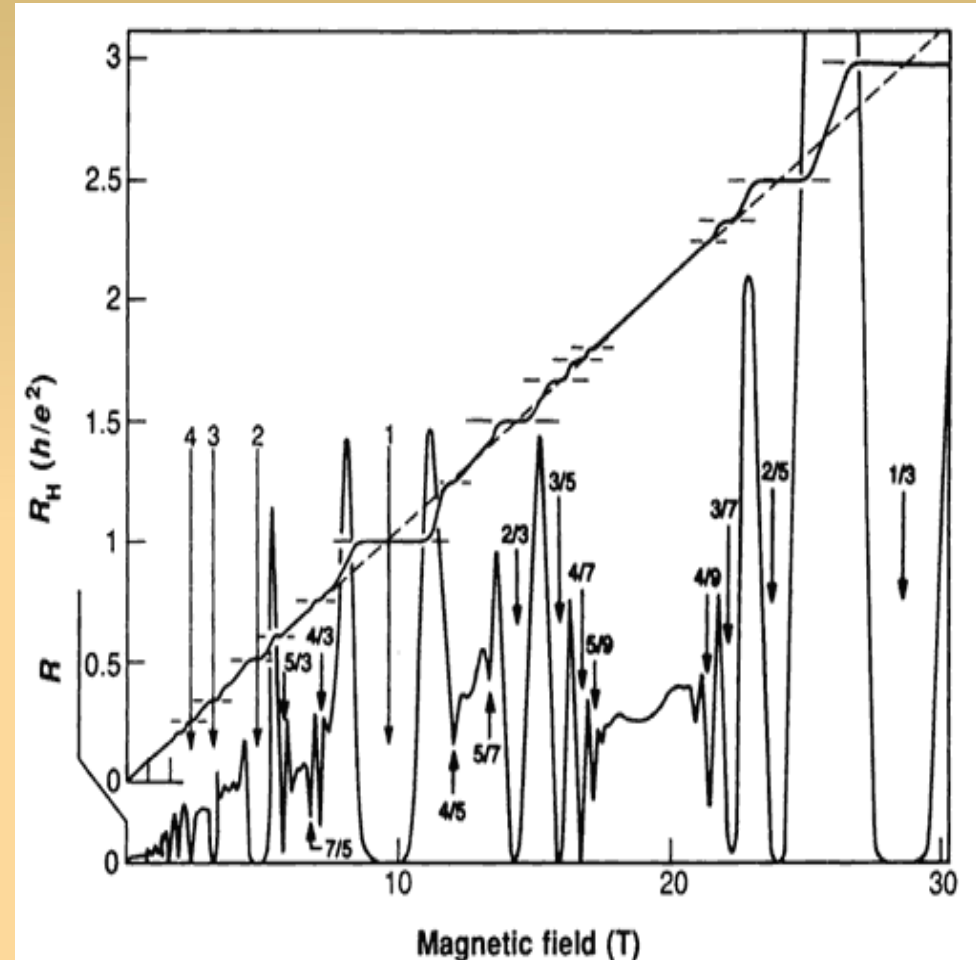
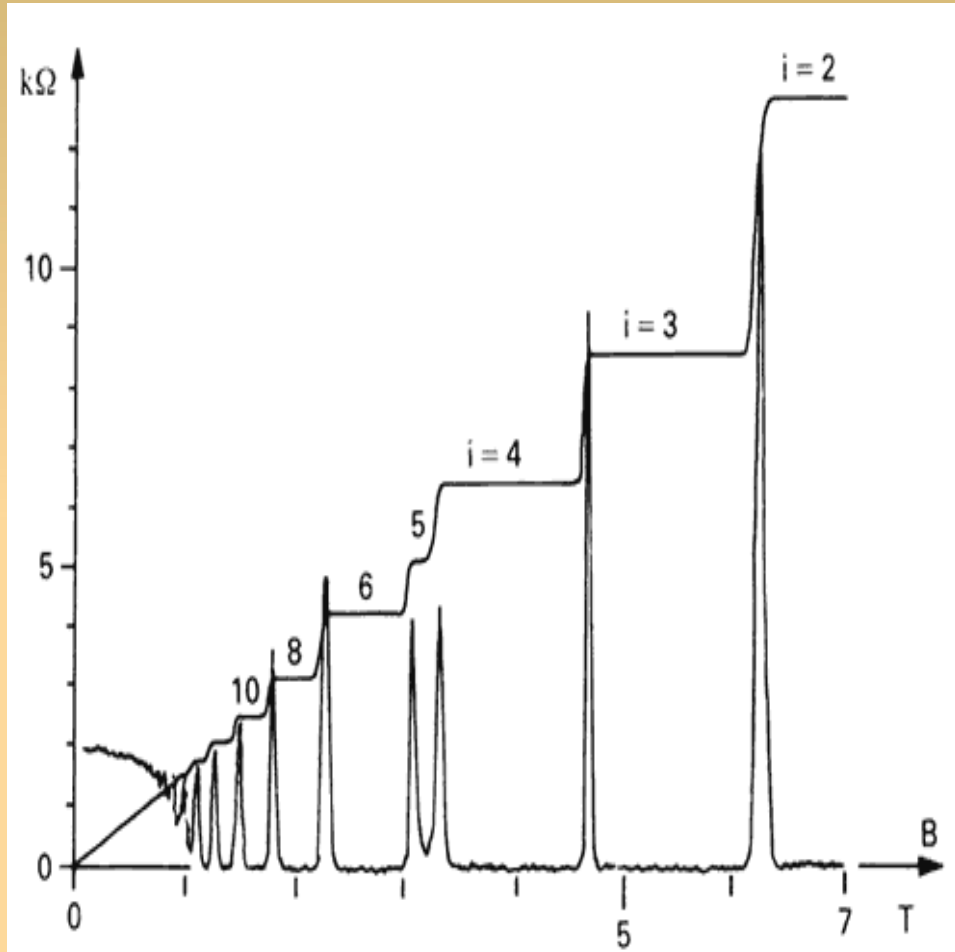
- *Краевые состояния – бездиссипативный транспорт*
- *Принципиальная схема реализации квантовых интерферометров в режиме КЭХ*
- *Фабри-Перо – интерферометр Гольдмана.*
- *Мах-Цендер – интерферометр Хайблюма.*
- *Интерферометр на со-направленных краевых состояниях.*

Литература: обзор на русском языке

Физика Низких Температур, Том 39, Выпуск 1, 11-25 (2013)

Введение.
Краевой транспорт в режиме КЭХ.

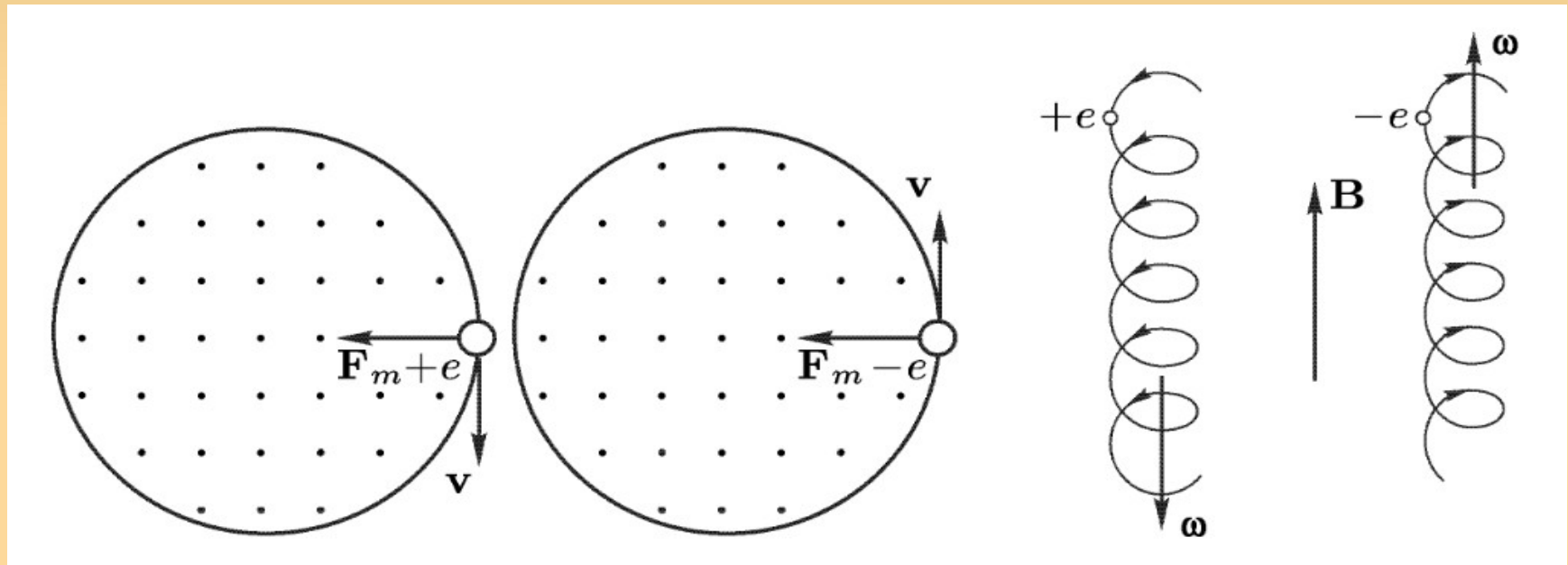
Квантовый Эффе́кт Холла.



Adopted from The Nobel Prize in Physics 1998
Press Release 13 October 1998

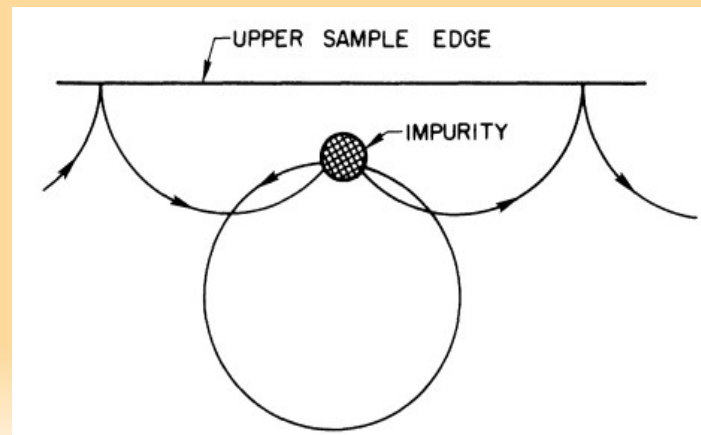
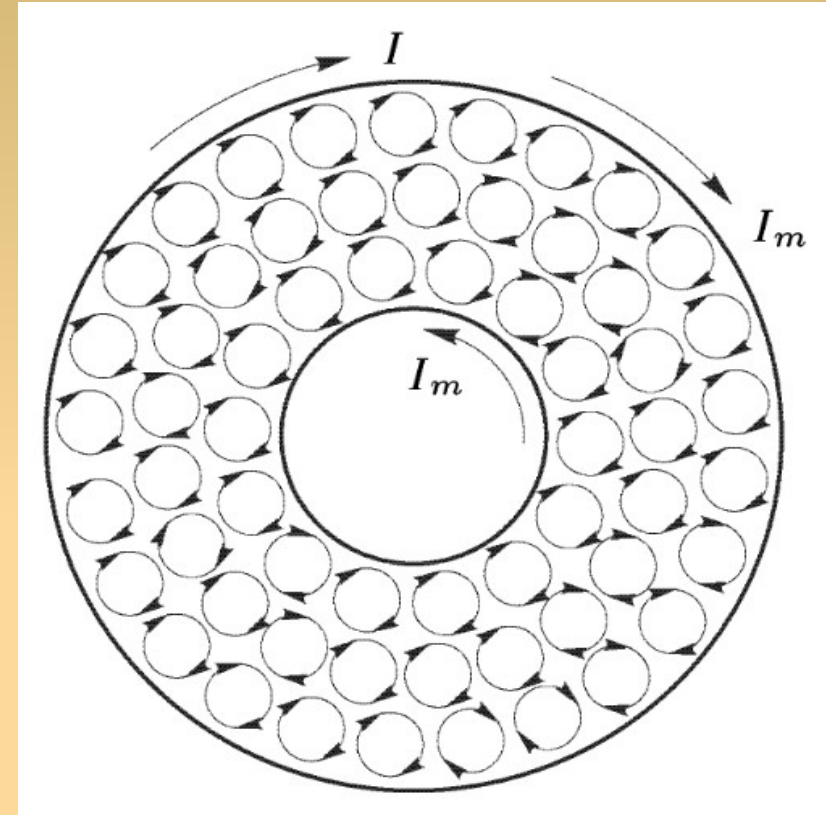
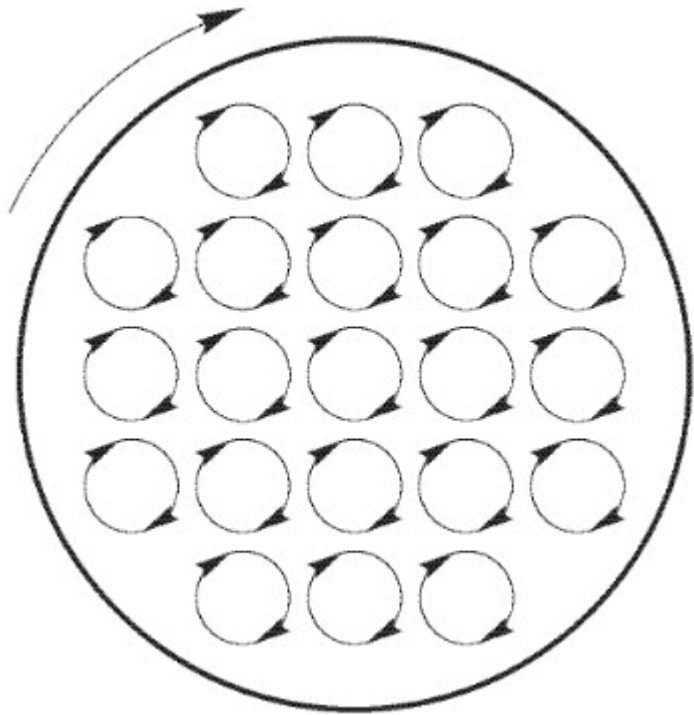
Сила Лоренца и движение электрона в магнитном поле

3. В постоянном магнитном поле на заряженную частицу действует сила $\mathbf{F}_m = (e/c)[\mathbf{v}\mathbf{B}]$. Эта сила перпендикулярна к скорости \mathbf{v} , а потому работы не производит. Она только искривляет траекторию, но не изменяет абсолютную величину скорости частицы. Не меняется, следовательно, и релятивистская масса частицы m .



$$\boldsymbol{\omega} = -\frac{e\mathbf{B}}{mc}$$

Край двумерной системы. Краевой ток



Квантование Ландау

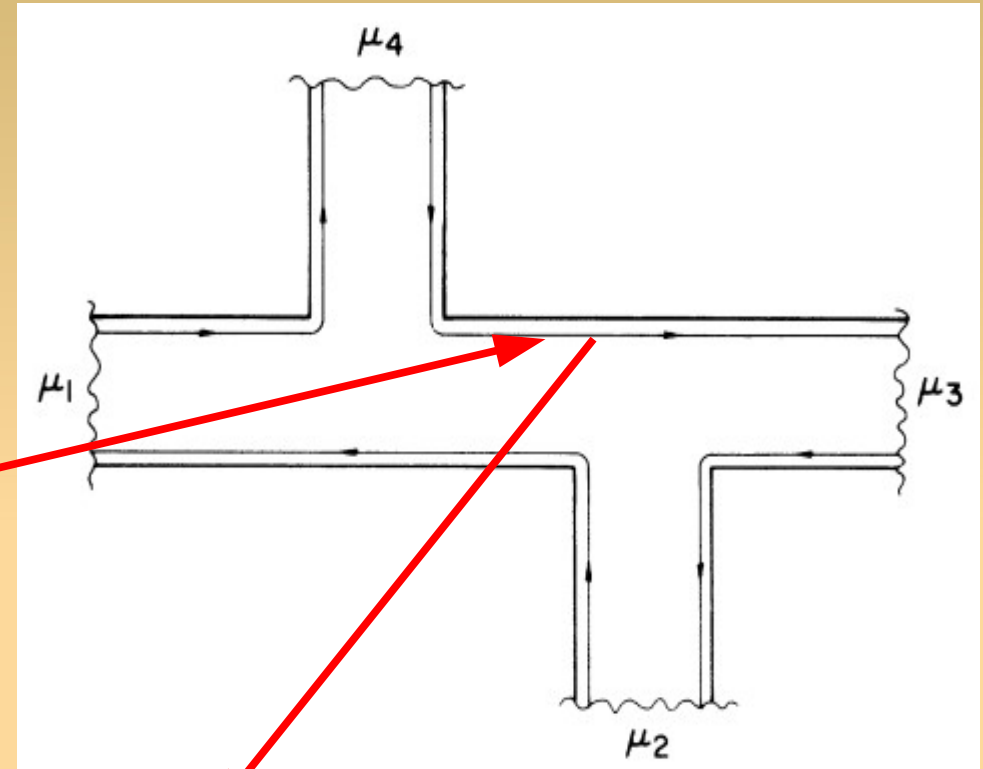
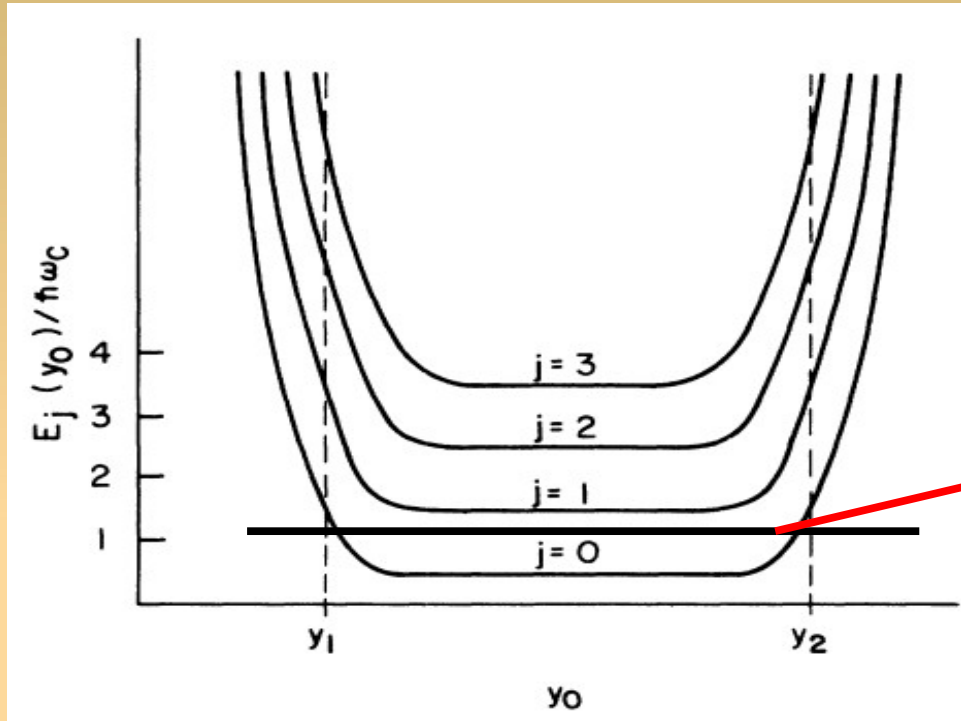
$$\mathbf{A}=(-Hy,0,0) \quad H = \frac{1}{2m} \left(p_x + \frac{eH}{c} y \right)^2 + \frac{p_y^2}{2m},$$

$$\psi = \exp \left(\frac{i}{\hbar} p_x x \right) \chi(y),$$

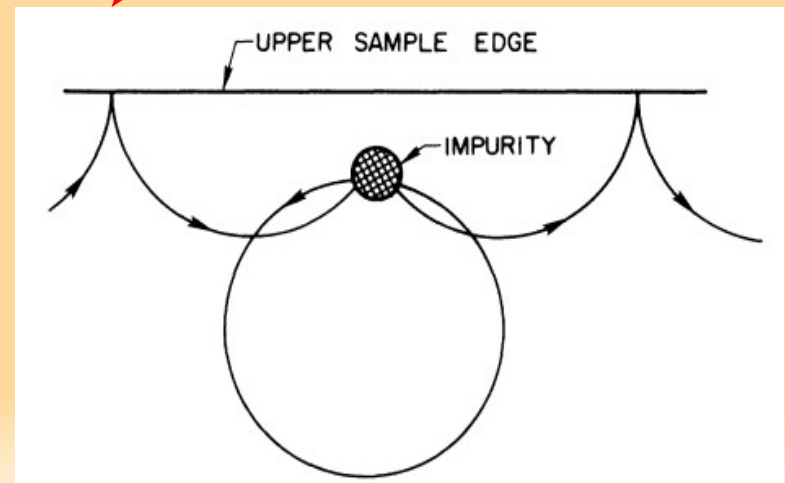
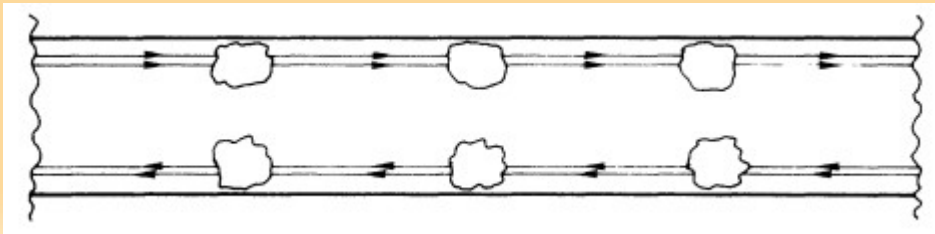
$$\chi'' + \frac{2m}{\hbar^2} \left[E - \frac{m}{2} \left(\frac{eH}{mc} \right)^2 (y - y_0)^2 \right] \chi = 0,$$

$$E = \frac{|e|H}{mc} \hbar \left(n + \frac{1}{2} \right), \quad y_0 = -cp_x / (eH) = -l_H^2 k_x$$
$$l_H = [c\hbar / (eH)]^{1/2}$$

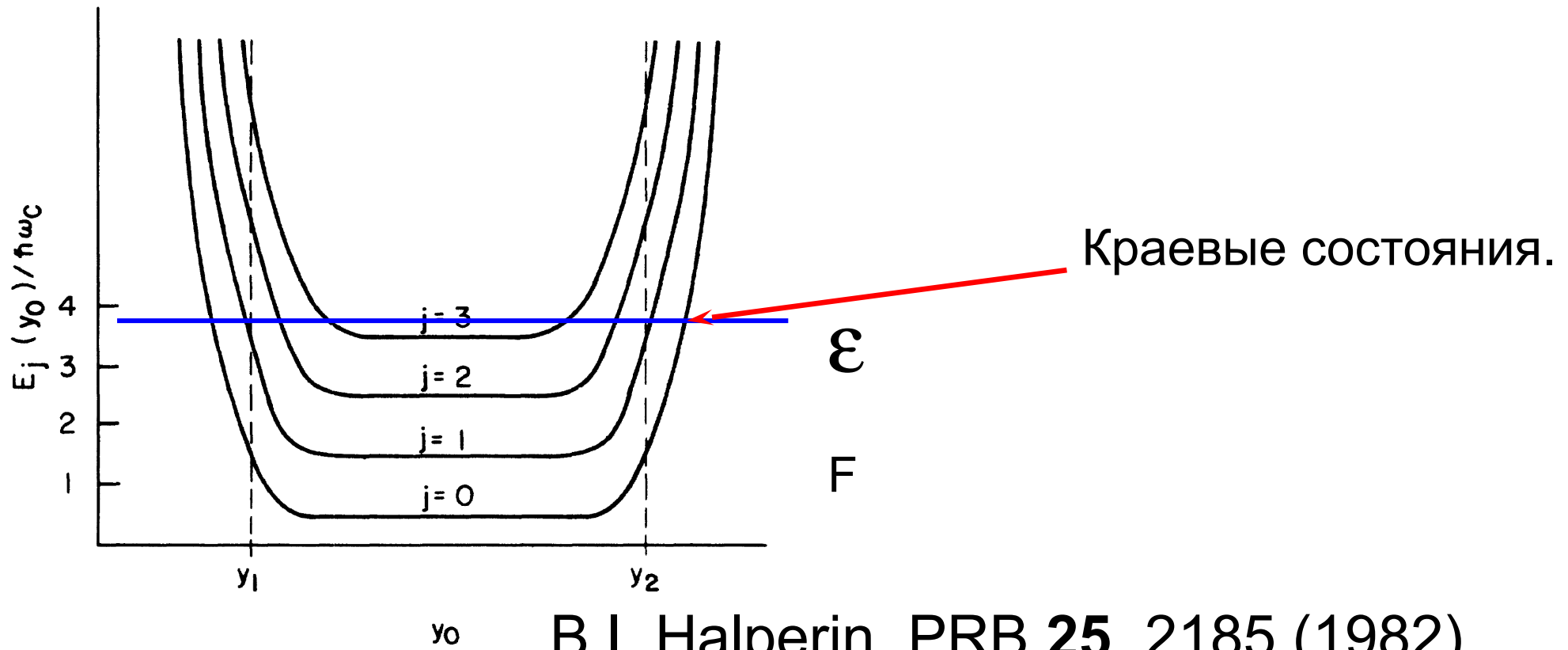
Край двумерной системы. Краевой ток



$$v_{jk} = \hbar^{-1} \frac{dE_{jk}}{dk} = \hbar^{-1} \frac{dE_{jk}}{dy_0} \frac{dy_0}{dk},$$

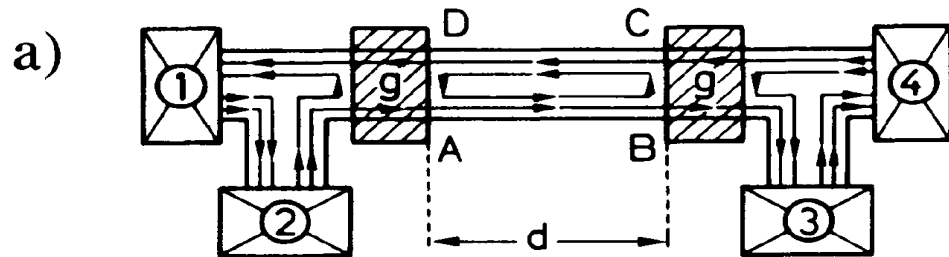


Краевой ток

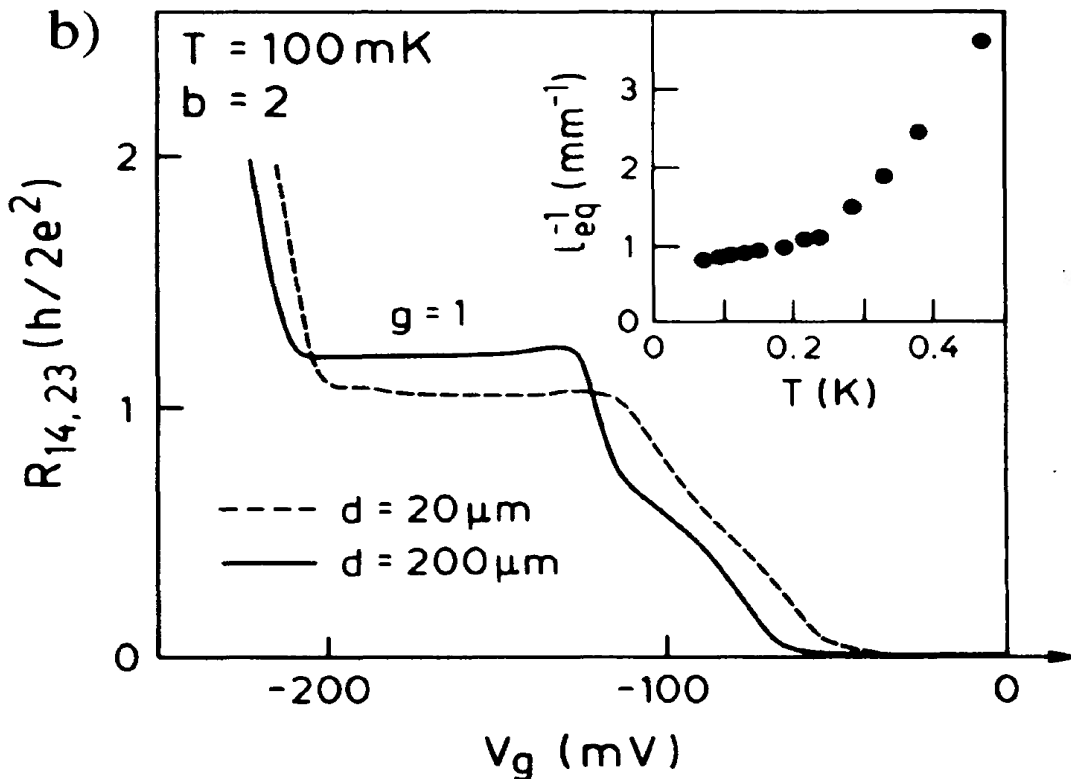


$$\begin{aligned}
 I &= \int_{y_1}^{y_2} j \, dy = - \int_{k_1}^{k_2} j l_H^2 \, dk = \\
 &= \frac{e}{h} \int_{k_1}^{k_2} \frac{\partial E}{\partial k} \, dk = \frac{e}{h} \int_{\mu_1}^{\mu_2} dE = \frac{e}{h} (\mu_1 - \mu_2) .
 \end{aligned}$$

Эксперименты с пересекающимся затвором



1. Проверка и подтверждение формализма Бюттикера



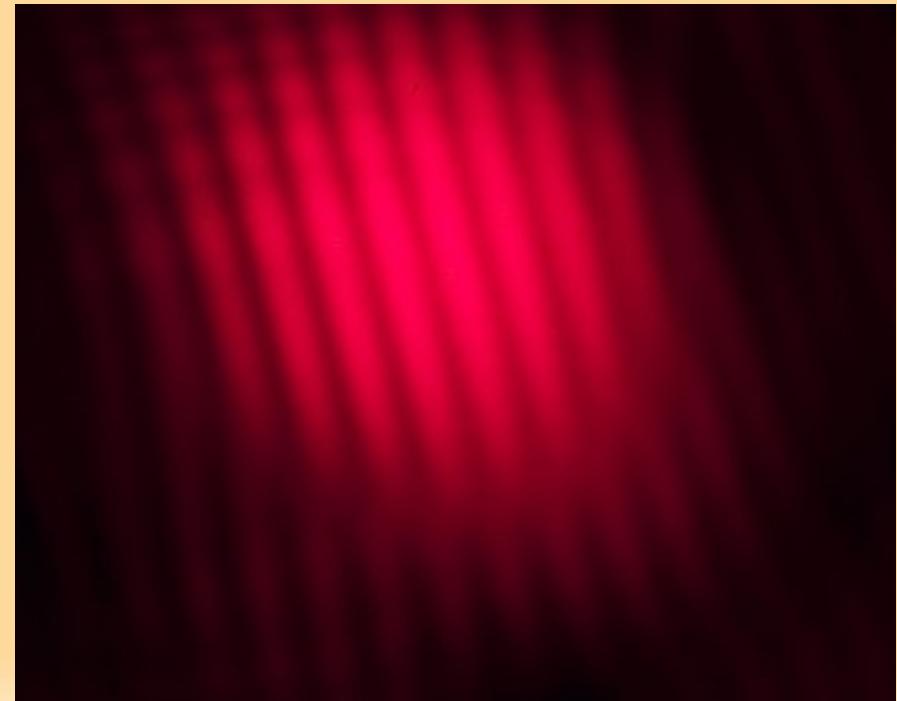
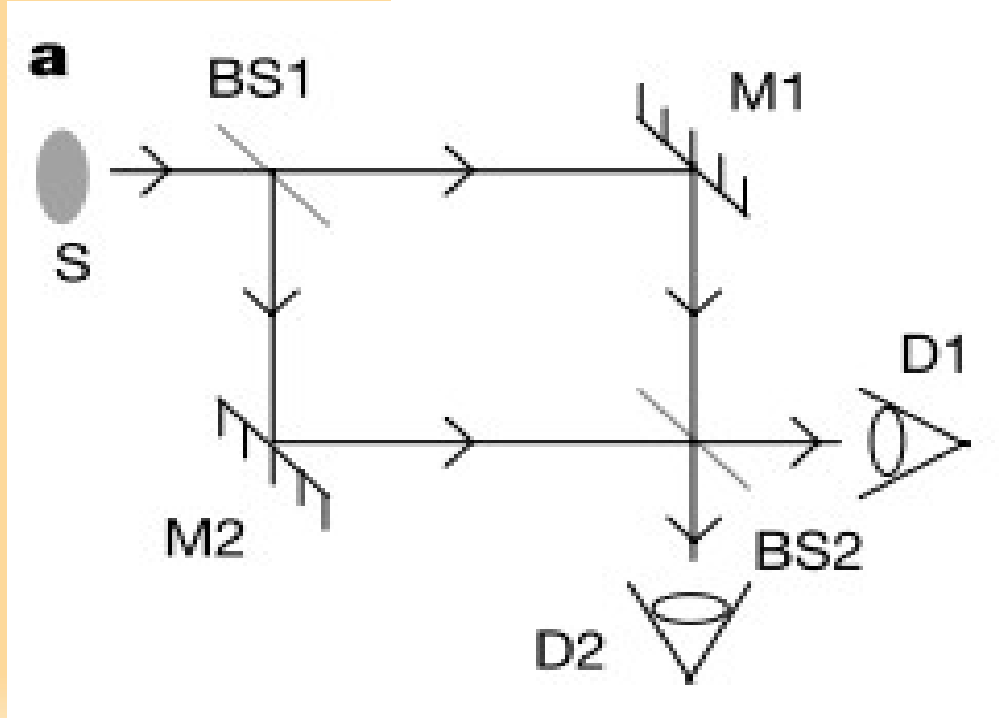
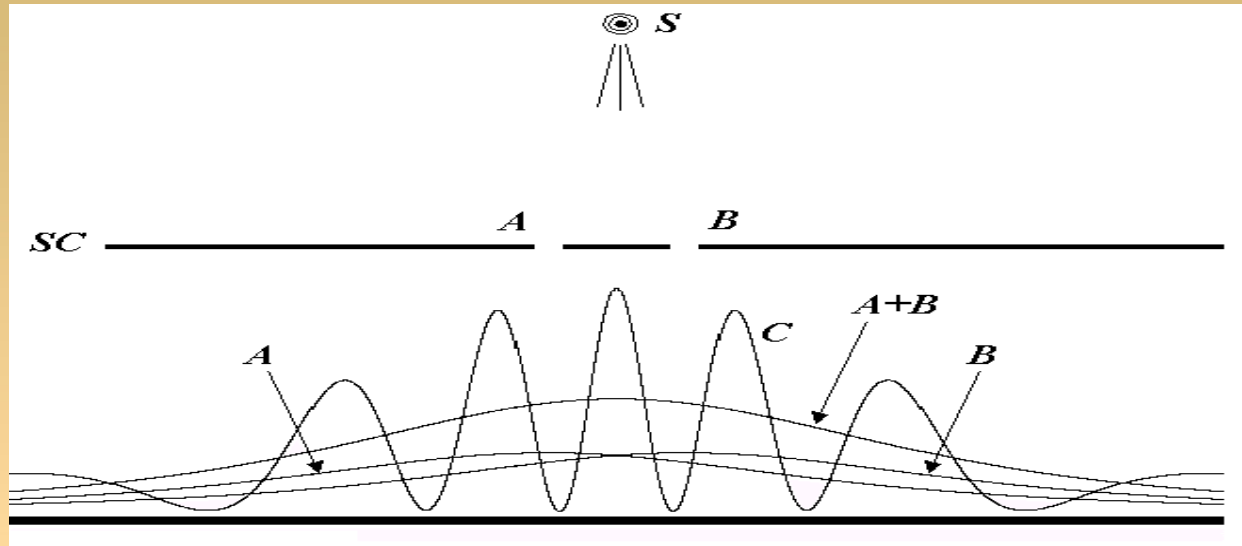
2. Численные значения для длины уравнивания между краевыми

$$R_{14,23} = \frac{h}{e^2} \left[1 + \exp \left(-\frac{2d}{l_{eq}} \right) \right]^{-1},$$

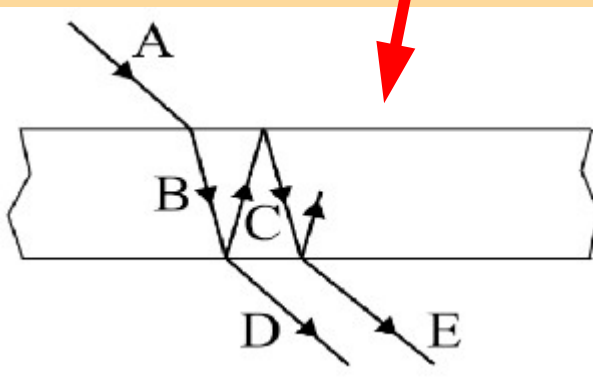
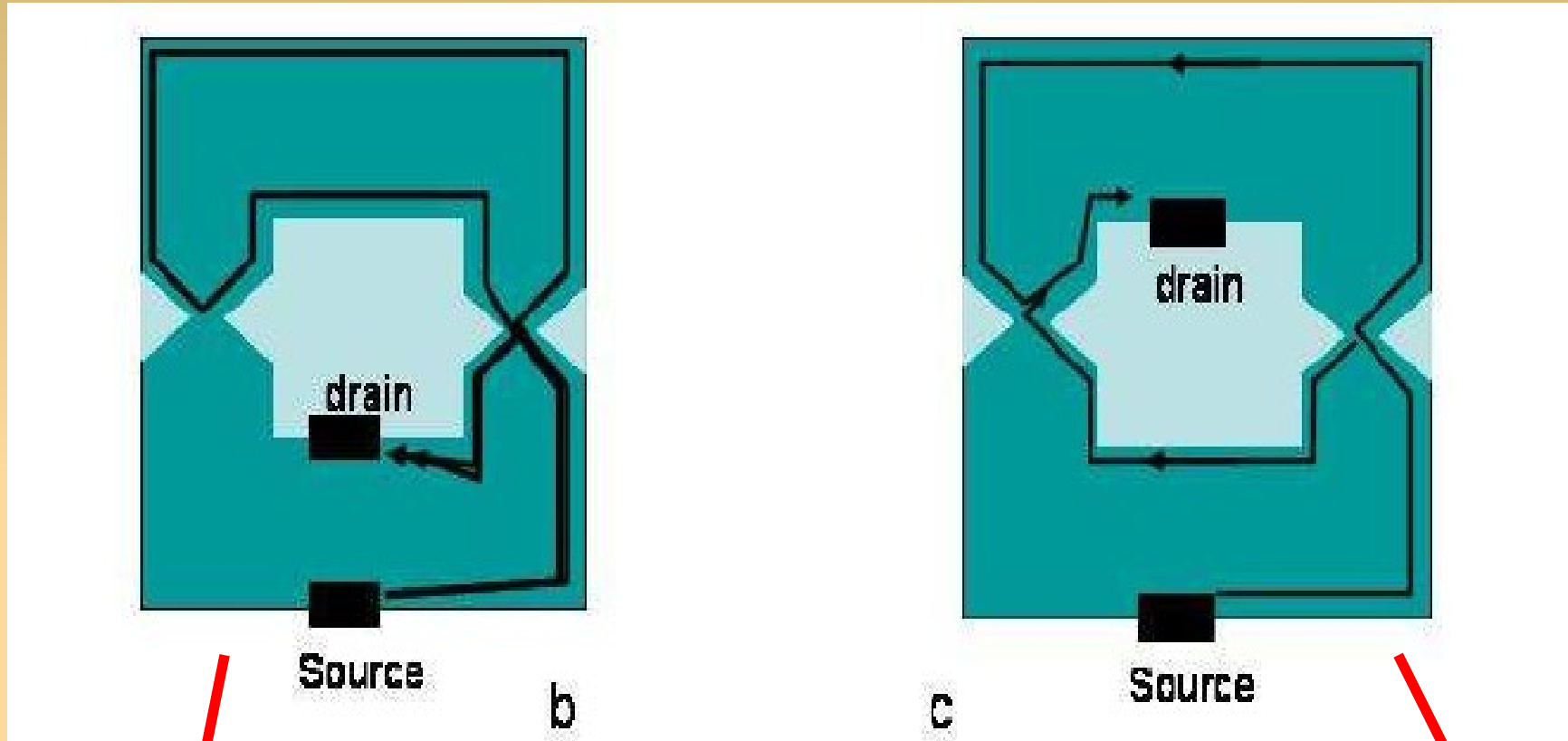
G. Müller *et al.* PRB **45**, (1992)

Электронные интерферометры в режиме КЭХ – стандартный подход

Интерференция. Интерферометр Маха-Цендера в оптике.

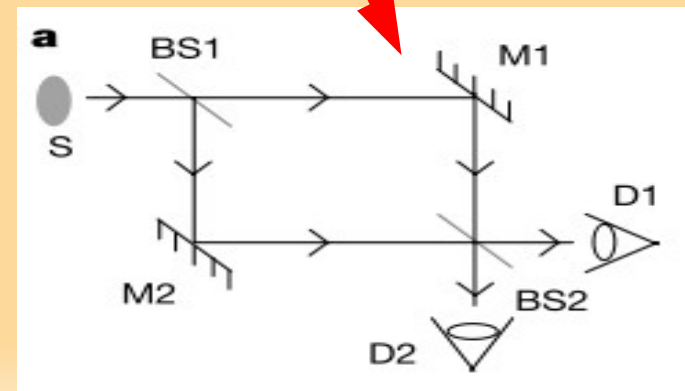


Принципиальная схема квантового интерферометра.



$$\Delta(BS) = \Phi_0$$

$$\Delta B = h/e^* S$$



Интерференция в транспортном токе.

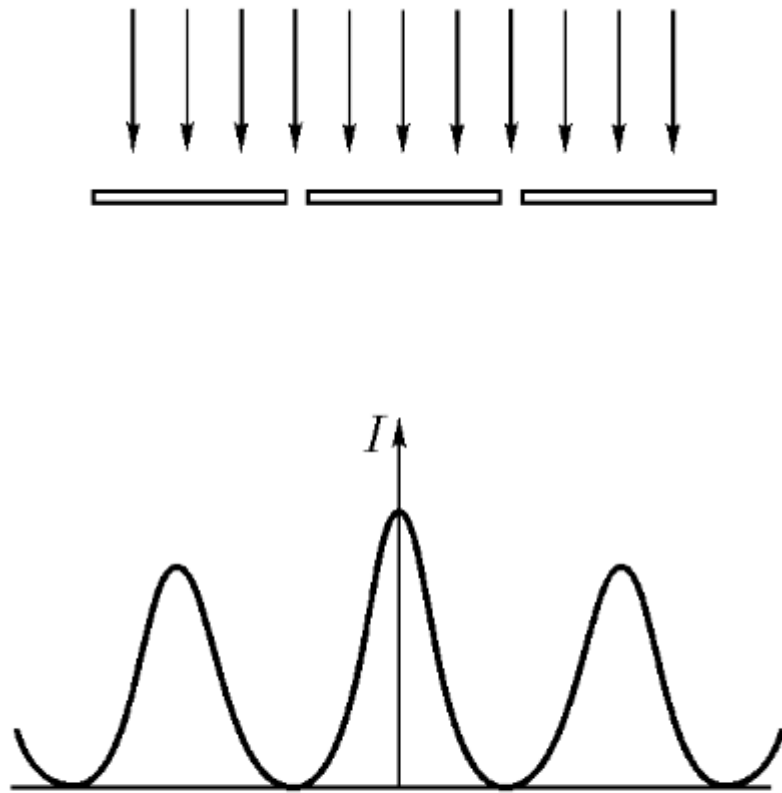
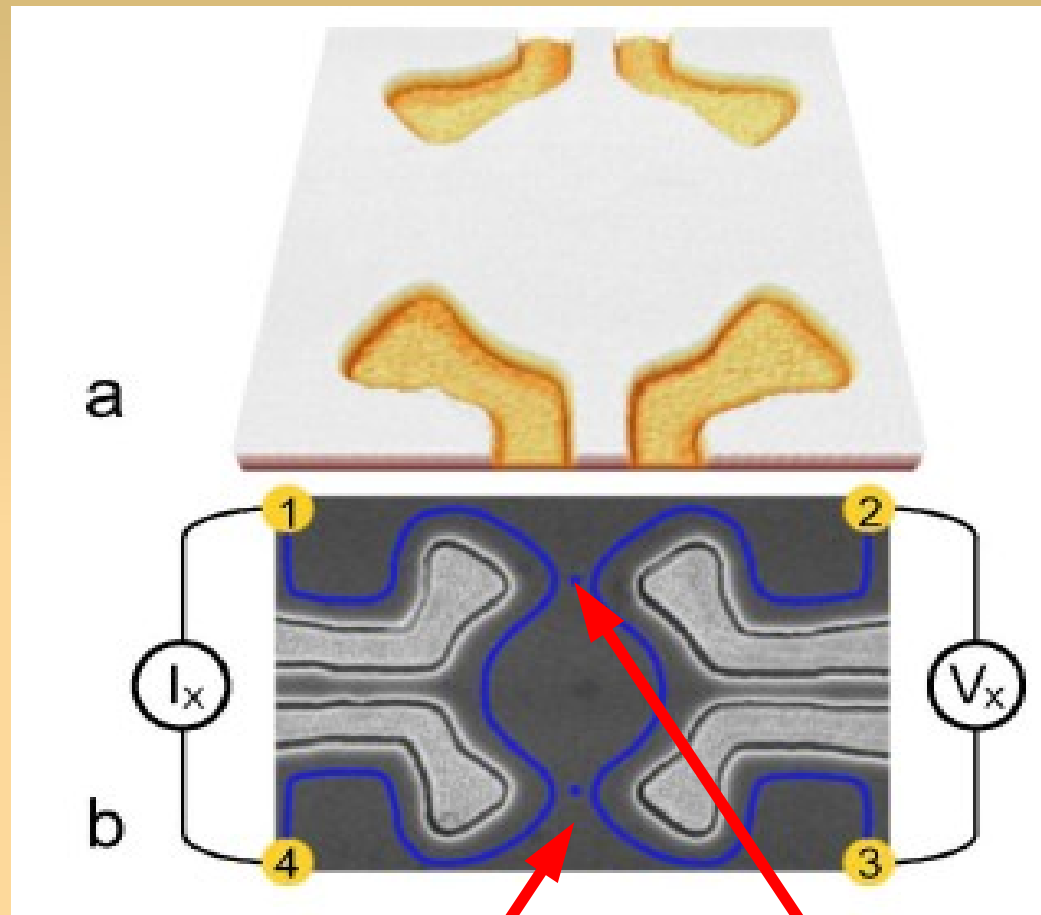


Рис. 11. Диаграмма распределения интенсивности света за экраном с двумя щелями.



Реализация стандартного интерферометра Фабри-Перо Гольдмана.

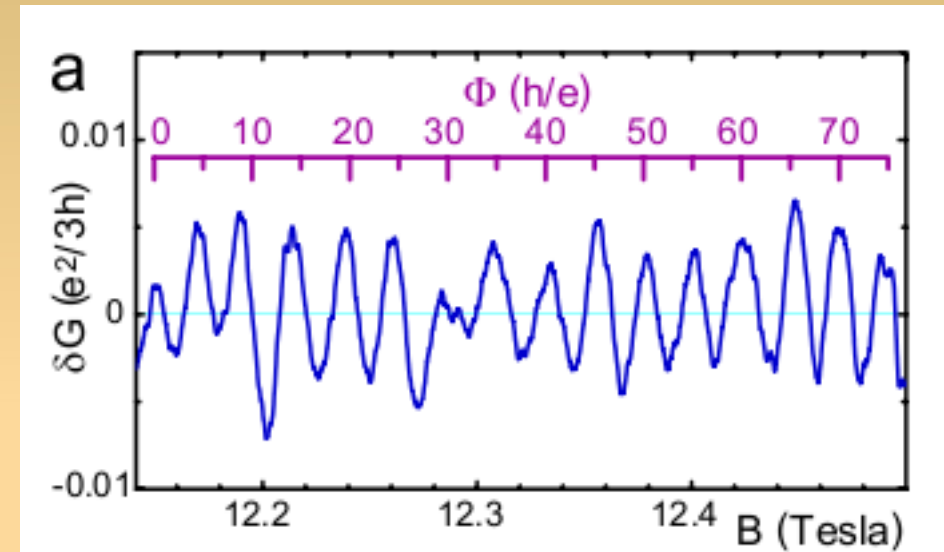
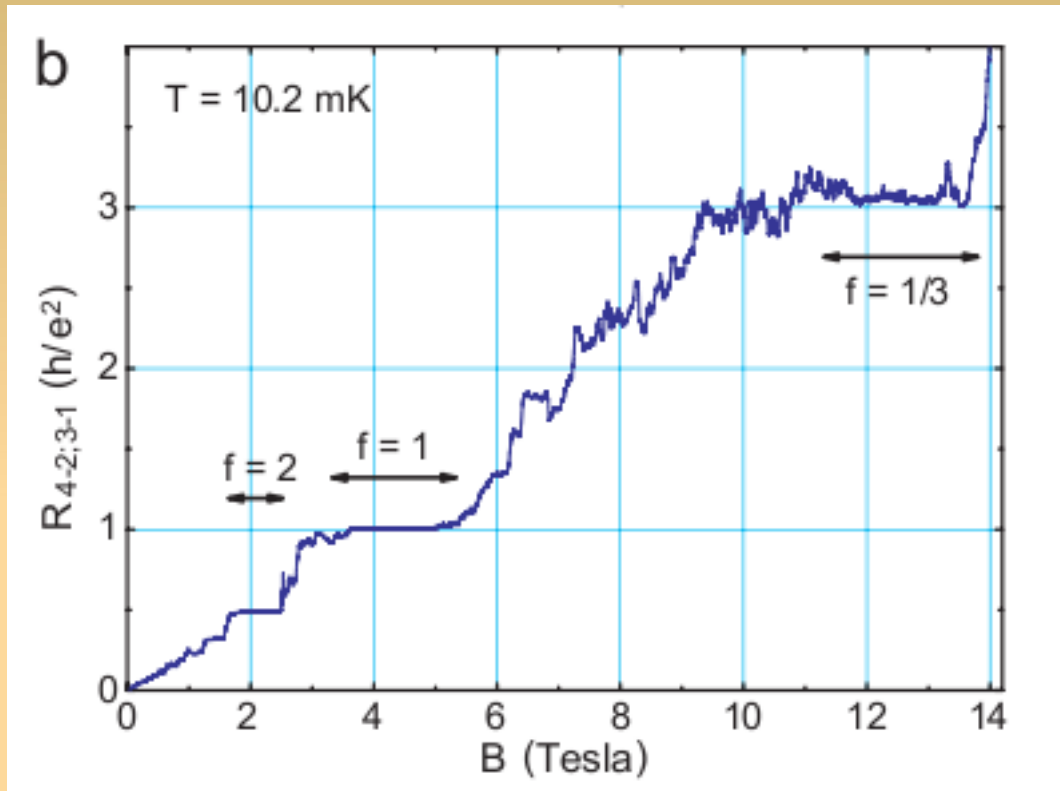


Идентичные, противоположно направленные краевые состояния в квантовом точечном контакте.

Adopted from F. E. Camino, Wei Zhou, and V. J. Goldman,

Phys. Rev. B 72, 075342 2005

Интерферометр Гольдмана (A Laughlin quasiparticle interferometer)

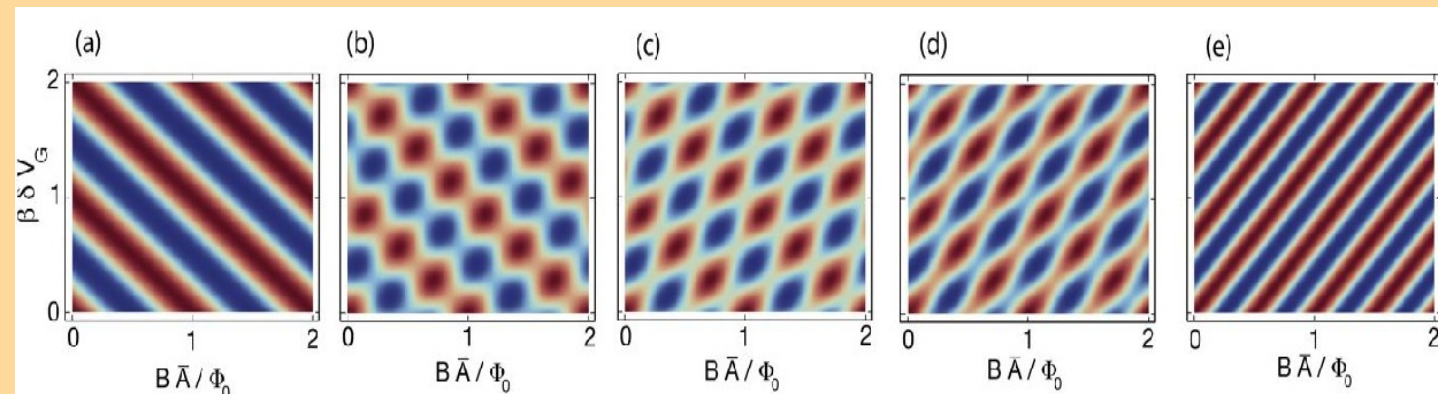
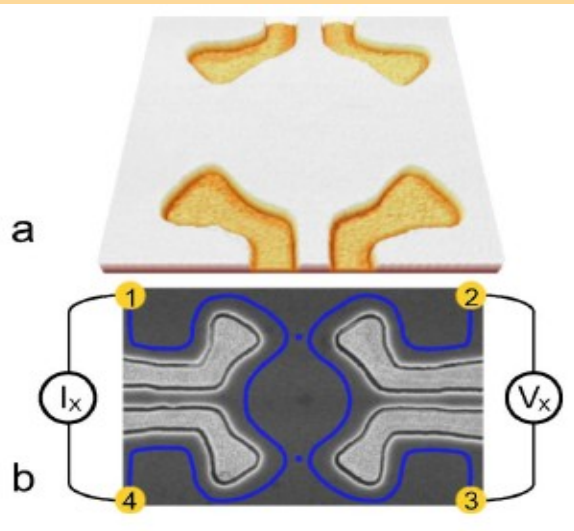


Adopted from F. E. Camino, Wei Zhou, and V. J. Goldman,
Phys. Rev. B 74, 115301 (2005)

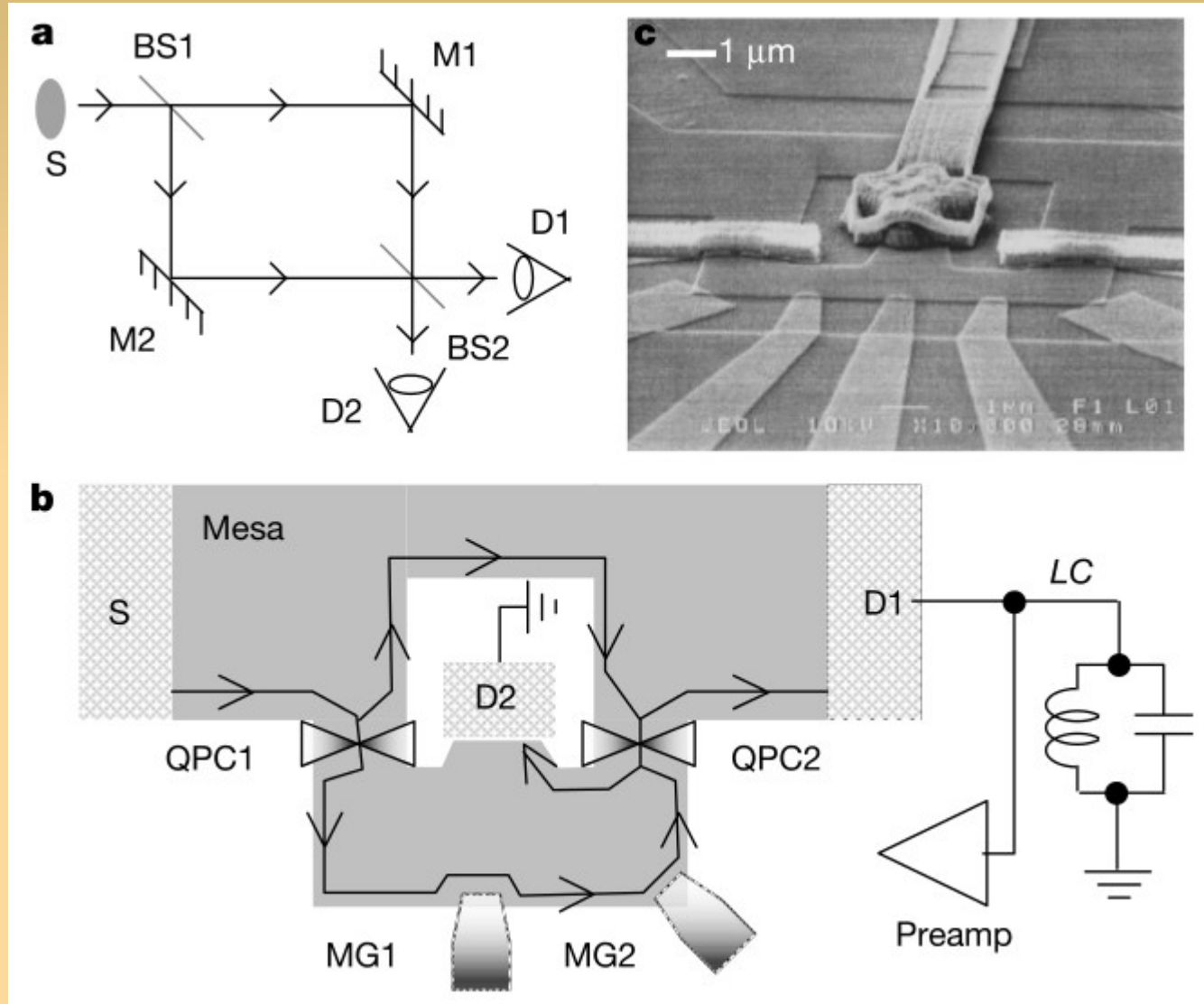
Интерферометр Гольдмана Результаты.

Продемонстрированы интерференционные осцилляции при целочисленных и дробных факторах заполнения.

- **Проблемы** — малая площадь, априори непостоянная при изменении магнитного поля; существенность эффектов перезарядки.
- **Результат** – неоднозначность интерпретации результатов для дробного заряда и дробной статистики.

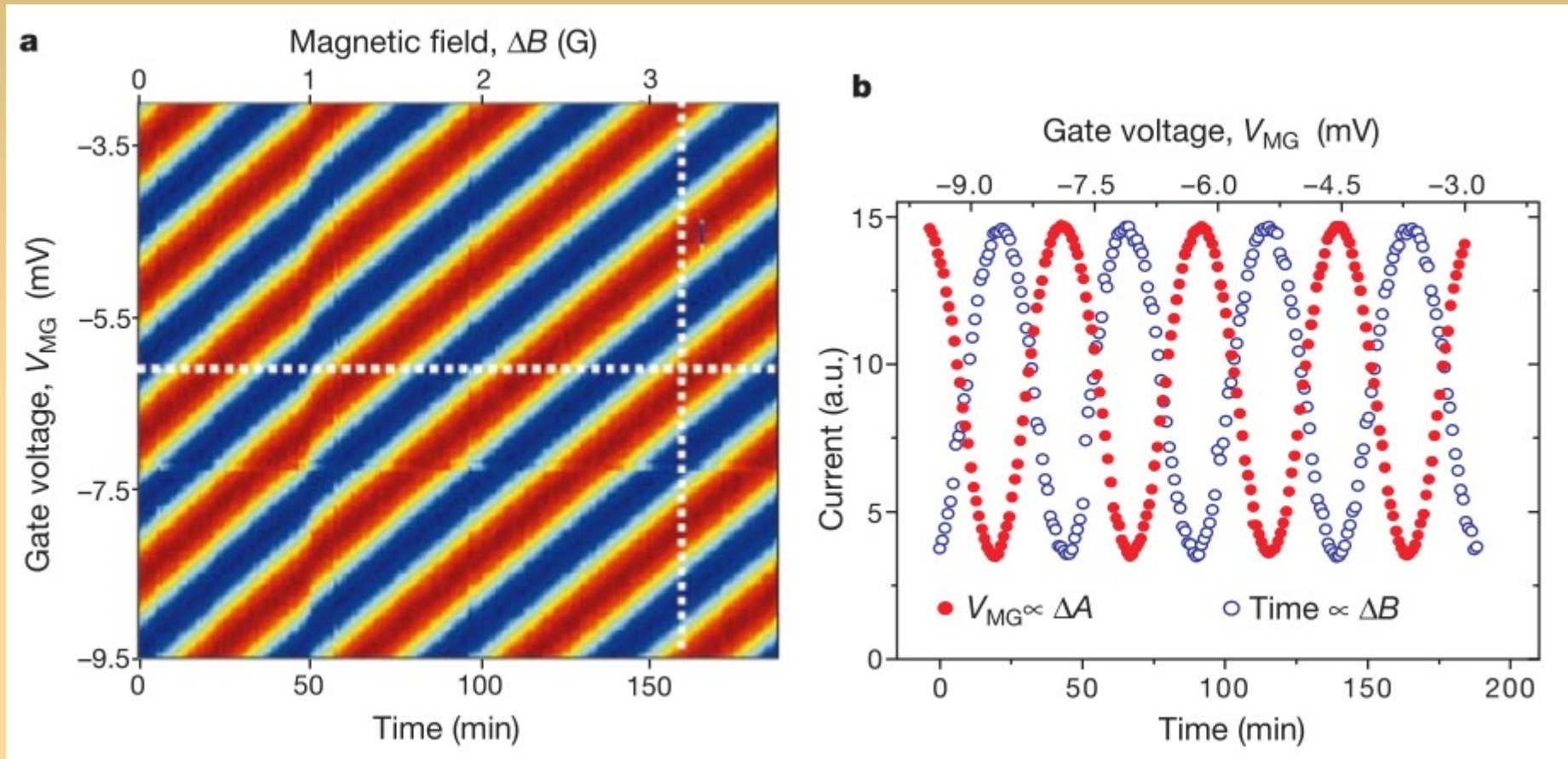


Интерферометр Маха-Цендера (Хайблум)



Adopted from: Y. Ji, Y. Chung, D. Sprinzak, M. Heiblum, D. Mahalu, and H. Shtrikman, Nature (London) 422, 415 (2003).

Интерферометр Маха-Цендера. Эксперимент



Adopted from: Y. Ji, Y. Chung, D. Sprinzak, M. Heiblum, D. Mahalu, and H. Shtrikman, Nature (London) 422, 415 (2003).

Интерферометр Маха-Цендера

Результаты.

Продемонстрированы интерференционные осцилляции при целочисленных факторах заполнения. Подробно исследована видность осцилляций и получены результаты для длины когерентности

- **Проблемы** — *очень большая площадь, что делает невозможным наблюдение осцилляций в режиме дробного КЭХ.*
- **Результат** — *невозможность использования для наблюдения дробного заряда и дробной статистики.*

Электронные интерферометры на со-направленных краевых состояниях

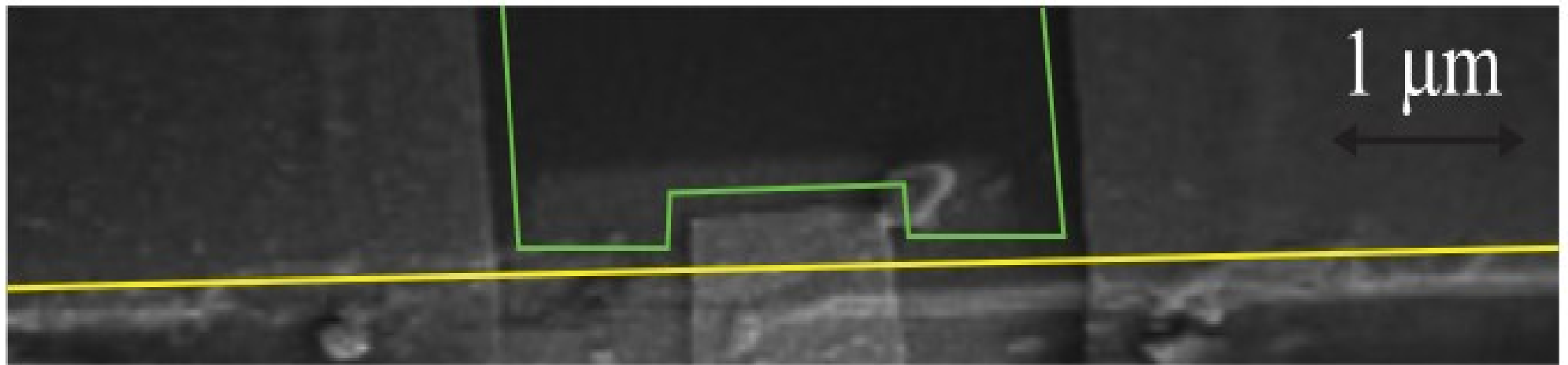
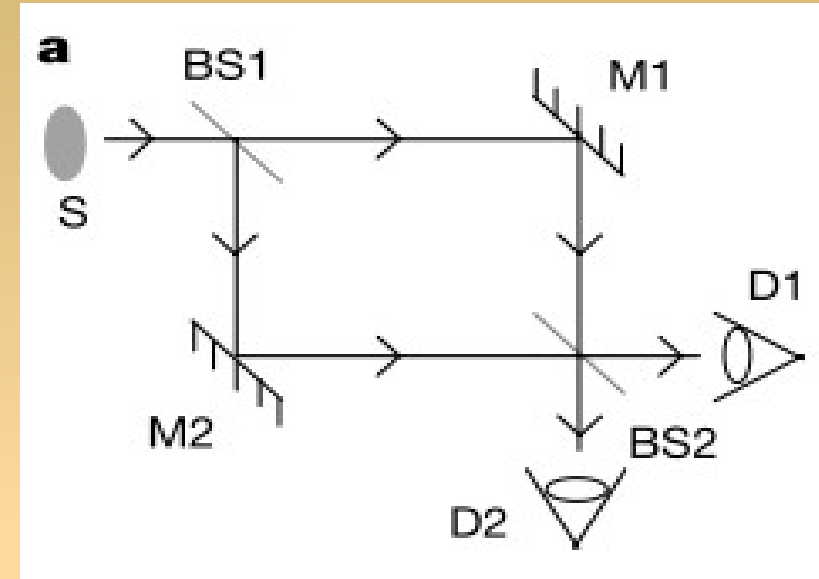
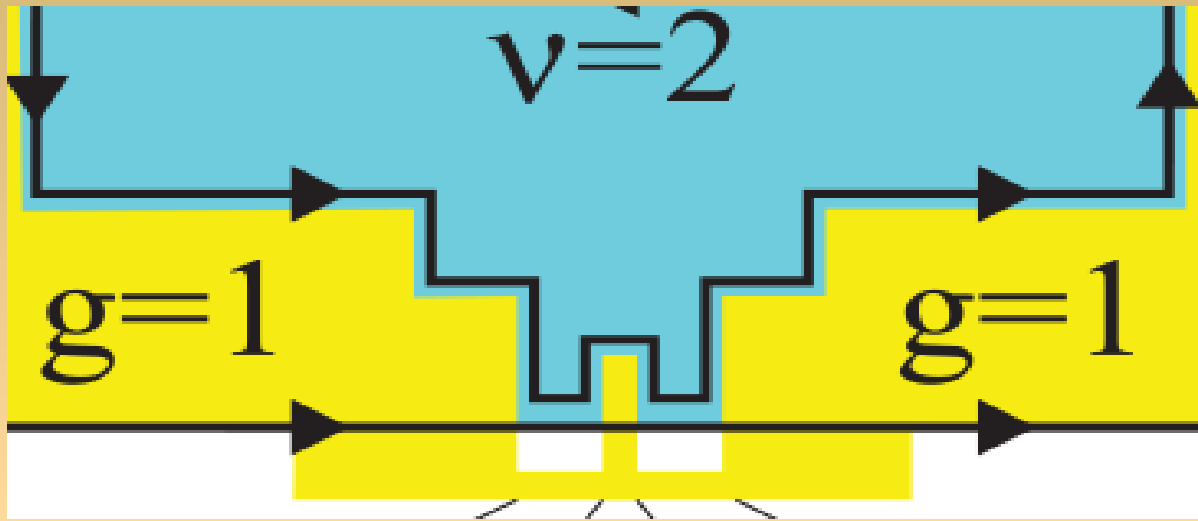
Quantum Hall Mach-Zehnder interferometer far beyond equilibrium
E. V. Deviatov, A. Ganczarczyk, A. Lorke, G. Biasiol, and L. Sorba
Phys. Rev. B 84, 235313 (2011)

Quantum Hall Mach-Zehnder interferometer at fractional filling factors
E. V. Deviatov, S. V. Egorov, G. Biasiol, and L. Sorba
EPL (Europhysics Letters) 100, 67009 (2012).

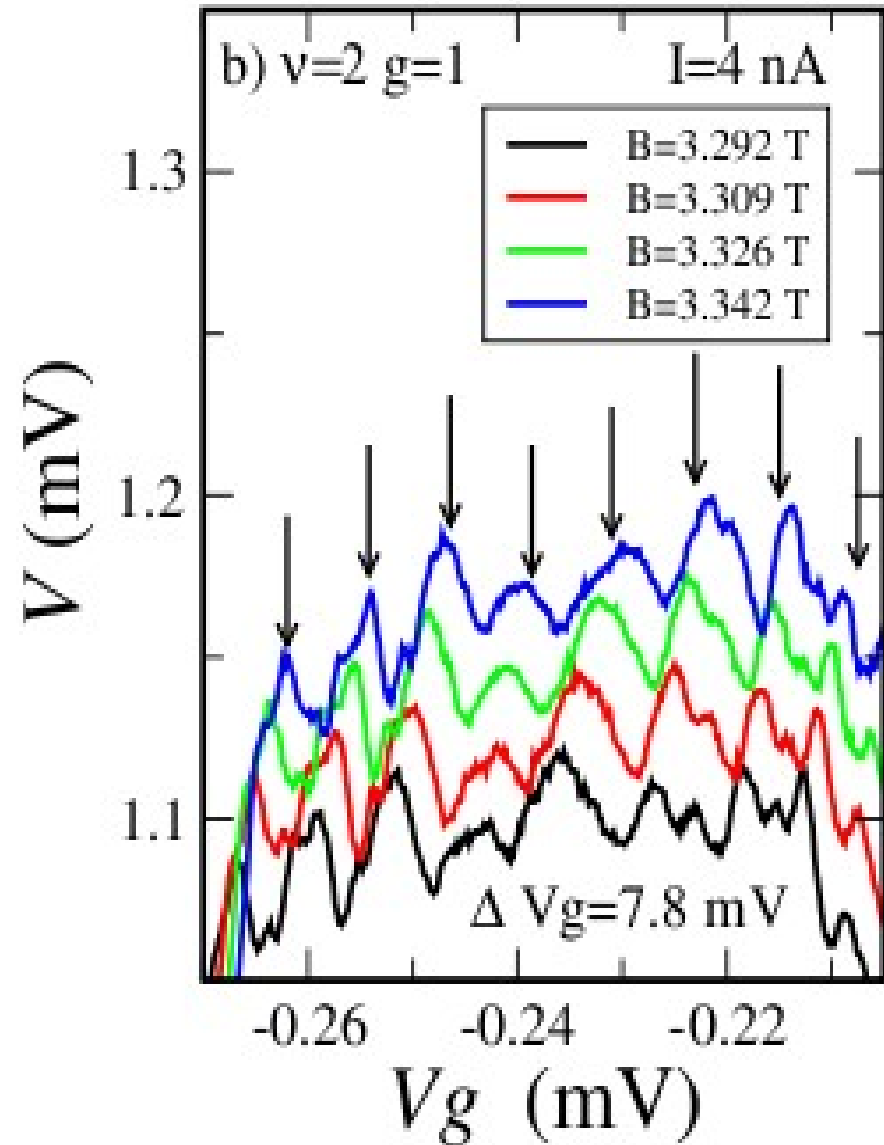
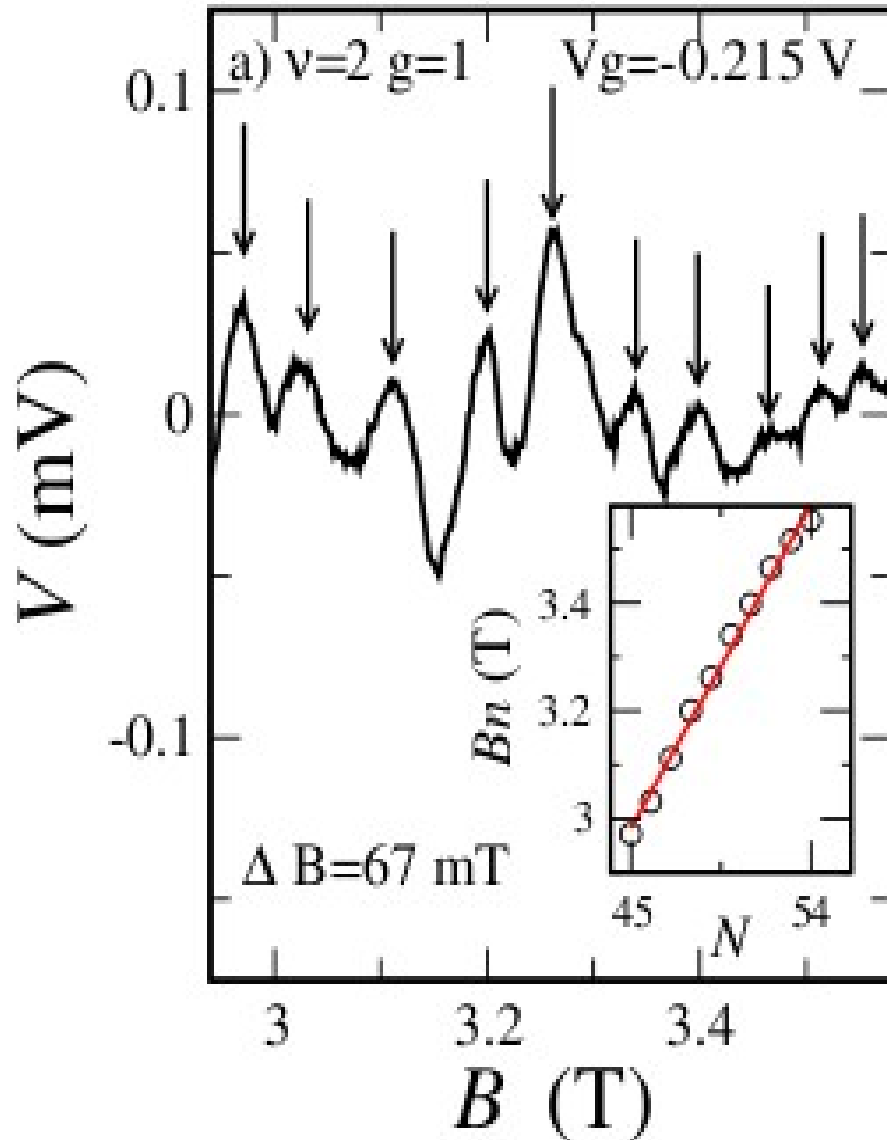
Interference effects in transport across a single incompressible strip at the edge of the fractional quantum Hall system
E. V. Deviatov, B. Marquardt, A. Lorke, G. Biasiol, and L. Sorba
Phys. Rev. B 79, 125312 (2009)

Experimental realization of a Fabry-Perot-type interferometer by copropagating edge states in the quantum Hall regime
E.V. Deviatov and A. Lorke
Phys. Rev. B 77, 161302(R) (2008)

Реализация интерферометра Маха-Цендера.



Экспериментальные результаты. Интерференция при $T=30$ мК.



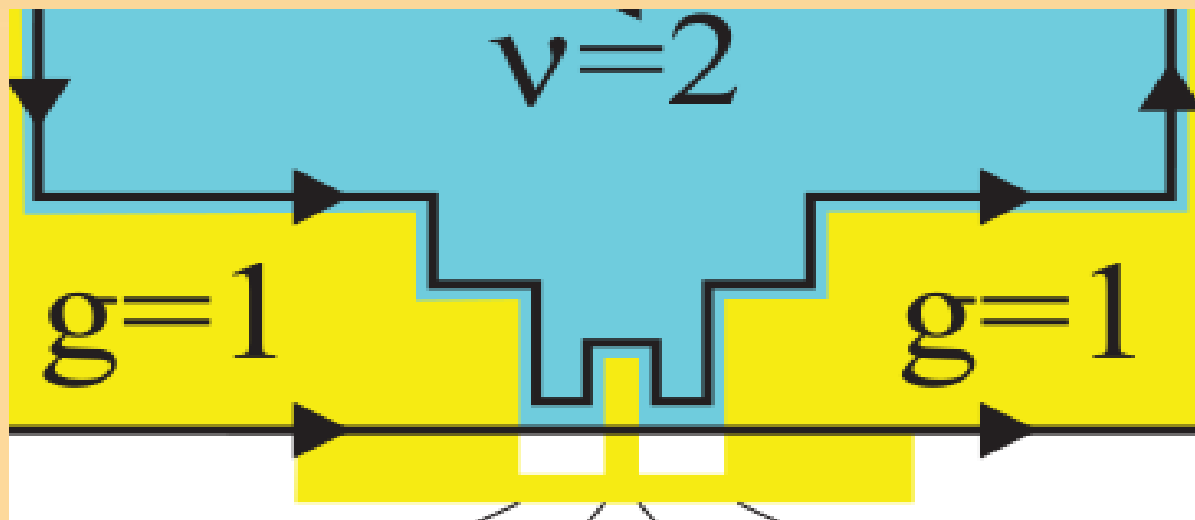
Основные экспериментальные результаты.

- *Период осцилляций по полю соответствует литографическим размерам центрального затвора и скалируется с изменением ширины этого затвора*
- *Продемонстрирована (по сдвигу осцилляций и независимости периода от фактора заполнения вне затвора) интерференционная картина типа Ааронова-Бома (что означает отсутствие эффектов перезарядки активной области интерферометра)*

$$\Delta(BS) = \Phi_0$$

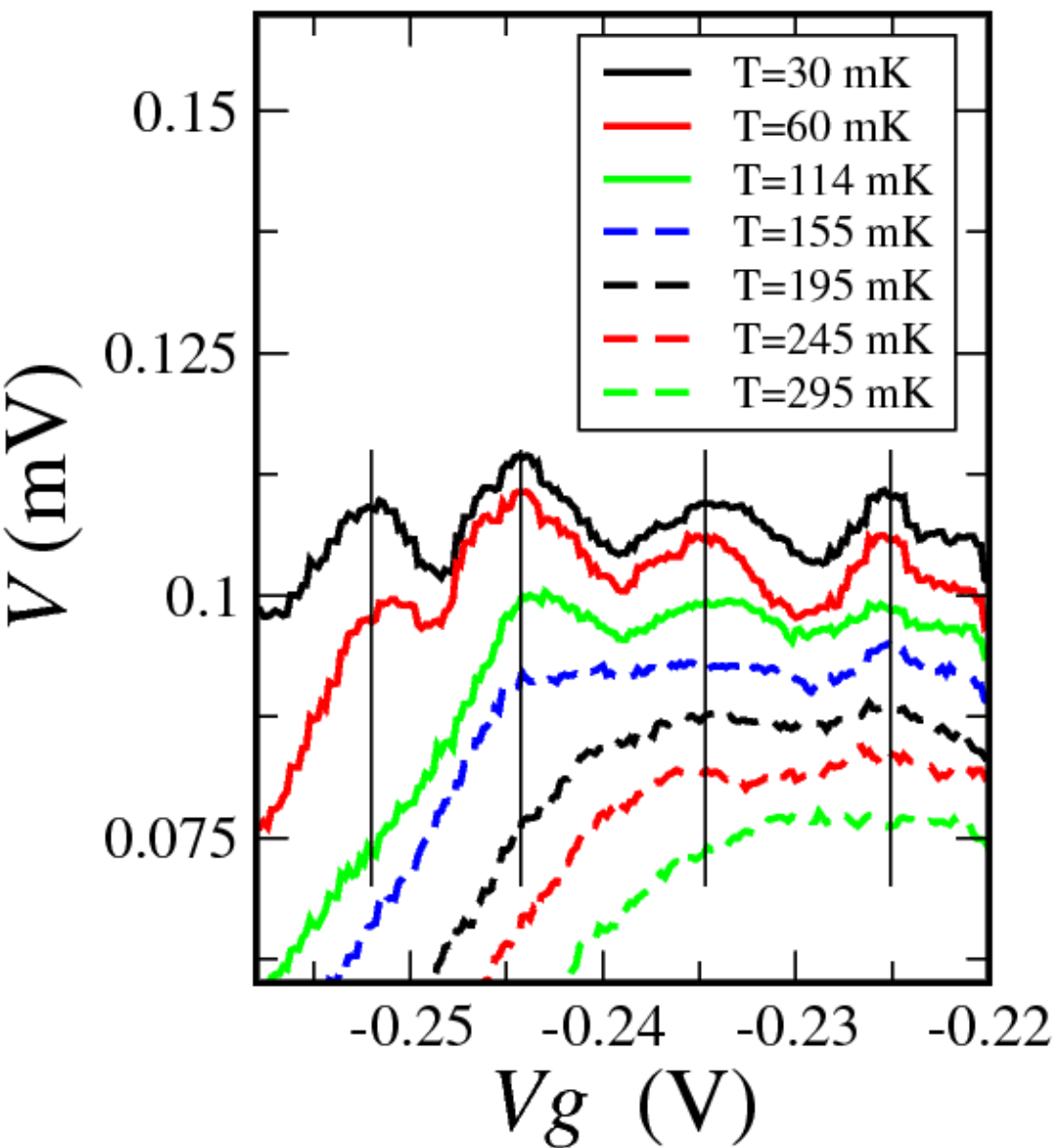
Осмысление – спин и разбаланс.

Как быть с высокими разбалансами и необходимостью вращать спин?

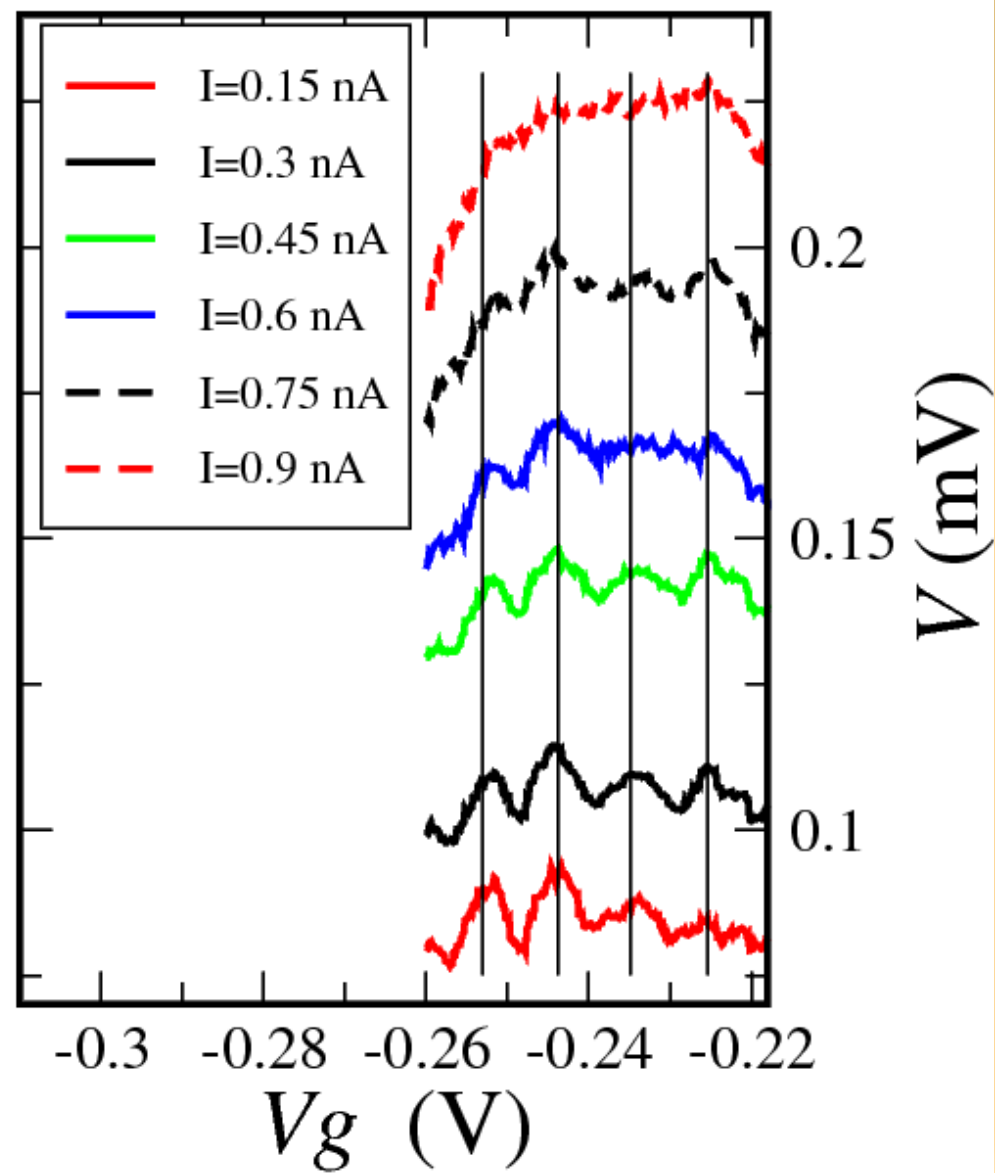


Режим дробного КЭХ при факторе заполнения $1/3$

a) $B=9.8756$ Т, $I=0.3$ нА



b) $B=9.8756$ Т, $T=30$ мК



Режим дробного КЭХ при факторе заполнения $1/3$

Периоды на $1/3$ и 1 соотносятся как

$$\Delta B^{1/3} \approx 3\Delta B^1$$

При $V_g = \text{const}$

and

$$\Delta V_g^{1/3} \approx 3\Delta V_g^1$$

при $B = \text{const}$

Каково условие интерференции?

$$\Delta(BS) = 3\Phi_0$$

$$\Delta(BS) = \Phi_0$$

C. de C. Chamon, et. al., Phys. Rev. B, 55, 2331 (1997)

Отличие экспериментальных режимов

При изменении магнитного поля при фиксированном затворном напряжении внутри состояния КЭХ, постоянен фактор заполнения. Можно было бы помыслить обе теоретические

возможности

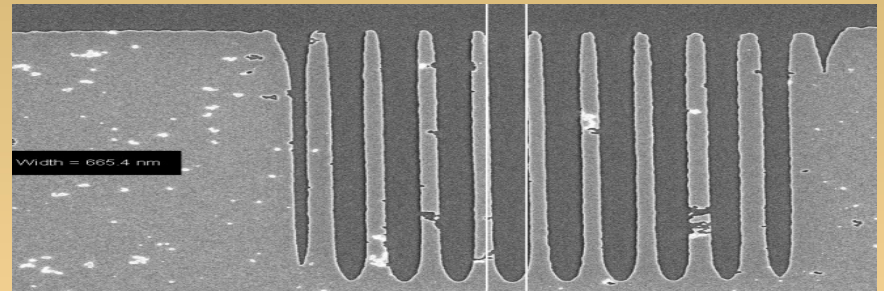
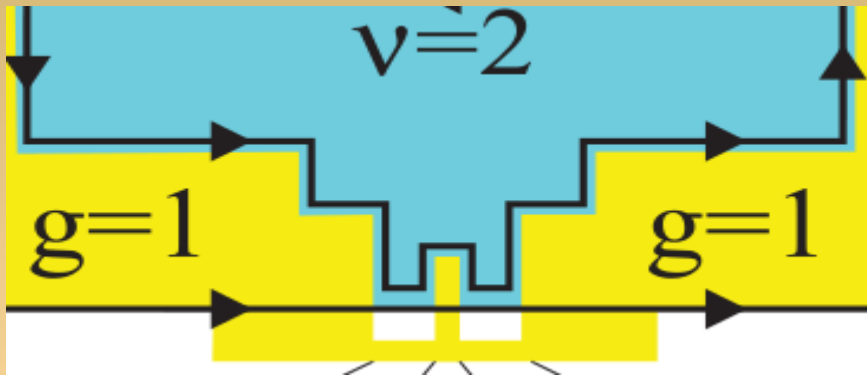
$$\Delta(BS) = 3\Phi_0$$

$$\Delta(BS) = \Phi_0$$

При изменении затворного напряжения в фиксированном магнитном поле внутри состояния КЭХ, постоянна концентрация носителей (состояние КЭХ несжимаемо, Экспериментальная демонстрация, например, Phys. Rev. Lett. 79, 729 (1997) , и т.п.). Поскольку магнитное поле также постоянно, именно в этом режиме квантовохолльное состояние инвариантно внутри петли интерферометра.

$$\Delta(BS) = 3\Phi_0$$

Реализация интерферометра квази-Фабри-Перо.



Неизвестна длина когерентности \Rightarrow большое количество затворов малого размера.

- Продемонстрированы интерференционные осцилляции при целочисленных и дробных факторах заполнения.*
- Проблемы квази-Фабри — малая площадь, малая стабильность, плохая повторяемость элементов.*

Изготовление полупроводниковых образцов. Нанотехнологии.



Зачем это нужно?

- *Макроскопический квантовый эффект.*
- *Когерентность.*
- *Квантовые вычисления.*

